

ПОСТРАДАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ – МАТЕРИАЛОВ ЧЕХЛОВ ОТРАБОТАВШИХ ТВС РЕАКТОРА БН – 350

С.Б. Кислицин, А.С. Диков, Д.А. Сатпаев, А.С. Ларионов
Институт ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан,
ул. Ибрагимова 1, Алма-Ата, 050032, Казахстан, skislitsin@inp.kz

Приведены результаты испытаний на ползучесть и длительную прочность в температурно-силовом интервале, характерном для условий длительного хранения отработанного топлива, нержавеющей сталей 12Х18Н10Т, 08Х16Н11М3 и 1Х13М2БФР - материалов чехлов отработавших тепловыделяющих сборок первого, второго и третьего поколений реактора на быстрых нейтронах БН-350. Определены скорости пострадиационной ползучести и механизмы разрушения этих сталей.

Введение

Конструкционные нержавеющие стали аустенитного класса 12Х18Н10Т, 08Х16Н11М3 и феррито-мартенситного класса 1Х13М2БФР применялись в качестве материалов для изготовления чехлов (шестигранных труб) тепловыделяющих сборок (ТВС) 1-го, 2-го и 3-го поколений реактора на быстрых нейтронах БН-350 Мангышлакского атомного энергокомбината в г. Актау. В настоящее время реактор БН-350 выведен из эксплуатации, отработанное топливо (ОЯТ) упаковано в контейнеры и отправлено на долговременное «сухое» хранение. В рамках проектов по декомиссии реактора БН-350 проводились исследования конструкционных материалов чехлов ТВС, направленные на выявление состояния материала чехлов после длительного облучения и «мокрого» хранения [1-2]. Было показано, что микроструктура и физико-механические свойства этих сталей претерпели значительные изменения: наблюдаются упрочнение, охрупчивание, распухание, коррозионные повреждения, а для ряда исследованных сборок наблюдалось появление трещин и разрушение материала чехла [1]. Оболочки ядерного топлива должны обеспечивать работоспособность не только в период активной эксплуатации, но и служить барьерами для предотвращения рисков распространения радиоактивности при последующих манипуляциях с ОЯТ, т.е. перегрузке, транспортировке, длительном хранении. Для определения остаточного ресурса конструкционных сталей ТВС в период длительного хранения ОЯТ были предприняты испытания образцов сталей 12Х18Н10Т, 08Х16Н11М3 и 1Х13М2БФР отработавших ТВС реактора БН-350 на пострадиационную ползучесть и, по возможности, длительную прочность в условиях, имитирующие длительное «сухое» хранение ОЯТ с последующим изучением изменений структуры для выявления причин деградации механических свойств.

Материалы, подготовка образцов и методика экспериментов

Для испытаний на ползучесть и длительную прочность изготавливались микрообразцы одного типоразмера в виде балочек толщиной (0.33-0.35) мм и размерами рабочей части (10×2) мм. Образцы приготовлены из пластин размерами 50 мм × 10 мм × 2 мм, которые, в свою очередь,

вырезались из верхних частей чехловых труб отработанных ТВС реактора БН-350 [3]. Образцы стали 12Х18Н10Т вырезаны с отметки «+500 мм» по отношению к центру активной зоны (ЦАЗ), образцы стали 08Х16Н11М3 – с отметки «+900 мм» по отношению к ЦАЗ и стали 1Х13М2БФР – с отметки «+500 мм» по отношению к ЦАЗ.

Характеристики облучения исследуемых образцов ТВС при эксплуатации сборки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Условия облучения исследуемых образцов.

Сталь	T, °C	S, сна	Скорость набора дозы, сна/с
12Х18Н10Т	400	~ 2-3	$0,5 \times 10^{-8}$
08Х16Н11М3	365	~ 6	$1,8 \times 10^{-8}$
1Х13М2БФР	350	~ 10	$1,9 \times 10^{-8}$

Выбор образцов для исследований обусловлен тем, что структура и физико-механические свойства верхней части оболочек ТВС претерпели более значительные изменения по сравнению с нижней частью оболочек. При этом выбирались ТВС, не имеющие явных дефектов – трещин, сквозных коррозионных повреждений.

Испытания на ползучесть при одноосном растяжении проводили на универсальной двухколонной испытательной машине LR5KPlus при температурно-силовых условиях, соответствующих условиям длительного сухого хранения ОЯТ. Температура испытаний составляла 350 °C, нагрузка – 100 Н, скорость нагружения до заданной нагрузки – 0.5 мм/мин, время выхода на температуру испытаний – 1 час, полное время испытаний ~ 1500 час. Подробно методика испытаний на ползучесть описана в работе [3].

Предварительно, до испытаний на ползучесть, проводились кратковременные механические испытания на одноосное растяжение с постоянной скоростью деформации при комнатной температуре и при 350 °C для определения пластичности (δ) и прочностных характеристик сталей, т.е. $\sigma_{0.2}$ - напряжения на условном пределе текучести и σ_B – предела прочности.

Результаты испытаний и их обсуждение

Кратковременные механические испытания на одноосное растяжение проводились при комнатной температуре с целью характеристики со-

стояния материала чехлов и при температуре 350 °С, т.е. близкой к температуре облучения в период эксплуатации и температуре, при которой проводились испытания на ползучесть. Результаты испытаний, а именно, характеристики пластичности и прочности приведены в таблице 2.

Таблица. 2. Результаты испытаний на одноосное растяжение исследуемых образцов конструкционных сталей отработавших ТВС реактора БН-350.

Сталь	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
	T = 20 °C			T = 350 °C		
12X18H10T	674	733	15.5	578	620	14.6
08X16H11M3	857	906	14.9	721	744	5.5
1X13M2БФР	1095	1106	7.0	678	1005	4.7

Из таблицы 2 видно, что увеличение температуры испытаний приводит к снижению прочности материала. Это согласуется с общепринятыми представлениями о том, что характеристики прочности и пластичности материалов активной зоны после длительного облучения чувствительны не только по отношению к параметрам облучения (температура, повреждающая доза), но и к температуре испытаний. Из таблицы 2 также следует, что стали 08X16H11M3 и 1X13M2БФР обладают значительно более высокими прочностными характеристиками (σ_B и $\sigma_{0.2}$) по сравнению со сталью 12X18H10T, как при комнатной температуре, так и при температуре 350 °С. В то же время пластичность стали 1X13M2БФР наименьшая по сравнению с аустенитными сталями 12X18H10T и 08X16H11M3. Несмотря на низкую пластичность стали 1X13M2БФР, можно ожидать, что длительная прочность при испытаниях с постоянной нагрузкой в одинаковых условиях (нагрузка, температура) для этой стали будет выше по сравнению с аустенитными сталями 12X18H10T и 08X16H11M3, так как сталь 1X13M2БФР обладает наибольшим «запасом прочности», т.е. разницей между пределом прочности и пределом текучести ($\sigma_B - \sigma_{0.2}$). Соответственно, время до разрушения для стали 1X13M2БФР будет большим.

Испытания на ползучесть показали, что на диаграмме зависимости деформации от времени наблюдаются три стадии [3]: начальная, переходная и стадия установившейся ползучести. Для начальной стадии характерна высокая скорость ползучести. Продолжительность этой стадии (~ 50 - 150 часов) при напряжениях, меньших $\sigma_{0.2}$, тем больше, чем значительней разница между напряжениями при которых проводятся испытания и $\sigma_{0.2}$. Вторая стадия – переходная, характеризуется уменьшением удлинения, и ее продолжительность составляет несколько часов. И, наконец, третья стадия – стадия установившейся ползучести, для которой характерна примерно постоянная скорость деформации, по крайней мере, во временном интервале испытаний, выполненных в данной работе. Отметим, что при повышении нагрузки при длительных испытаниях продолжительность стадий изменятся, а при на-

грузке, соответствующей $\sigma_{0.2}$, переходная стадия отсутствует.

Наибольший интерес представляет собой стадия установившейся ползучести, т.к. именно она определяет долговременную прочность материала. Значения максимальной достижимой деформации и скорости деформации позволят оценивать период времени до разрушения материала.

Результаты испытаний – зависимость деформации ползучести от времени испытаний при температуре 350 °С и нагрузке 100 Н показаны на рисунке 2.

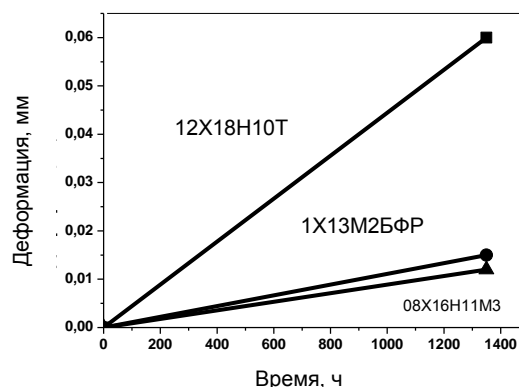


Рис. 1. Зависимость деформации от времени испытаний для облученных сталей 12X18H10T, 08X16H11M3 и 1X13M2БФР. Параметры облучения даны в таблице 1.

Скорости пострадиационной ползучести, определенные по результатам из зависимости деформации от времени на рис. 1, следующие:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_{12X18H10T} (100Н, 350^{\circ}C) &= 4.60 \cdot 10^{-5} \text{ мм/ч}, \\ \dot{\epsilon}_{08X16H11M3} (100Н, 350^{\circ}C) &= 1.08 \cdot 10^{-5} \text{ мм/ч}, \\ \dot{\epsilon}_{1X13M2БФР} (100Н, 350^{\circ}C) &= 1.15 \cdot 10^{-5} \text{ мм/ч}.\end{aligned}$$

Из полученных результатов по скорости ползучести видно, что при данных условиях длительных испытаний ($T_{исп.} = 350^{\circ}C$, нагрузка – 100 Н) наблюдается определенная корреляция между значениями скорости ползучести и $\sigma_{0.2}$ – чем больше $\sigma_{0.2}$, тем меньше скорость ползучести. Скорость ползучести стали 12X18H10T значительно больше скорости ползучести сталей 08X16H11M3 и 1X13M2БФР, а $\sigma_{0.2}$ стали 12X18H10T много меньше, чем сталей 08X16H11M3 и 1X13M2БФР. В то же время пределы текучести $\sigma_{0.2}$ сталей 08X16H11M3 и 1X13M2БФР близки по величине, и скорости их ползучести также различаются незначительно. Основываясь на этом, можно предположить, что длительная прочность стали 1X13M2БФР выше, т.к. «запас прочности» этой стали больше.

Изучение методом оптической микроскопии структуры сталей до и после испытаний на пострадиационную ползучесть показали, что в результате испытаний на ползучесть структура изменилась незначительно. Примеры структуры испытанной на ползучесть стали показаны на рис. 2.

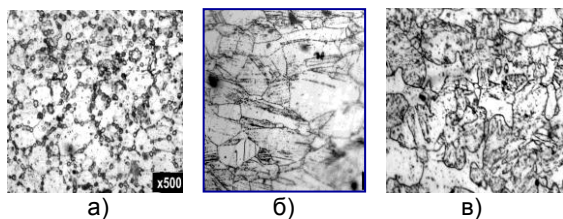


Рис. 2. Структура сталей 12X18H10T (а), 08X16H11M3 (б) и 1X13M2БФР (в) после испытаний на пострadiaционную ползучесть.

Для стали 12X18H10T характерной чертой структуры является большое число карбидов металлов (хрома), расположенных по границам зерен (рис. 2а), что ведет к образованию трансграничных трещин и разрушению стали [1].

В стали 08X16H11M3 карбиды металлов сосредоточены преимущественно в теле зерна. Но, как видно из рис. 2б, «слабыми» местами являются тройные стыки зерен. Зарождение трещин наблюдается именно в этих местах, и разрушение идет также по границам зерен [1].

В стали 1X13M2БФР карбиды металлов расположены преимущественно в ферритной фазе, характер разрушения хрупко-вязкий.

Закключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- Для исследованных типов сталей при напряжениях, меньших предела текучести на диаграмме испытаний на ползучесть, наблюдается три стадии ползучести: начальная, характеризующаяся повышенной скоростью ползучести, переходная и установившаяся стадия, для которой характерна постоянная скорость ползучести. При напряжении, равном или выше предела, переходная стадия практически отсутствует.

- Скорость ползучести при напряжениях, меньших предела текучести, коррелирует с величиной $\sigma_{0.2}$ стали: чем выше предел текучести, тем меньше скорость ползучести на установившейся стадии.

- Структура сталей в процессе пострadiaционных испытаний на ползучесть изменяется незначительно, что объясняется тем, что температура испытаний на ползучесть (350°C) меньше температуры облучения сталей в период эксплуатации в реакторе БН-350 ($T_{\text{обл.}} = 365 - 400^{\circ}\text{C}$) и контролируемые диффузией процессы шли в период эксплуатации в реакторе.

Работа выполнена в рамках Республиканской программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан».

Список литературы

1. Kadyrzhanov K.K., Kisilitsin S.B., Maksimkin O.P., Romanenko O.G. and Turkebaev T.E. Degradation in Mechanical Properties of Stainless Steels C0.12Cr18Ni10Ti and C0.08Cr16Ni11Mo3 – Materials for Hexagonal Ducts of Spent Fuel Assemblies from the BN-350 Fast Neutron Reactor. // Material of "Safety Related Issues of Spent Nuclear Fuel Storage". NATO sciences Series. 2007. P. 329-349.
2. Максимкин О.П., Кадыржанов К.К., Романенко О.Г., Кислицин С.Б., Чумаков Е.В., Кенжин Е.А., Яковлев И.Л., Турбарова Л.Г., Гусев М.Н., Тиванова О.В. Результаты материаловедческих исследований чехла отработавшей ТВС реактора БН-350 // Материалы 7-й международной конференции по реакторному материаловедению, Димитровград, РФ, 8-12 сентября, 2003. Димитровград. Т. 3. Часть 1. С. 204 - 221.
3. Диков А.С., Киреев В.В., Горцев А.П., Кислицин С.Б., Нестерова А.Ю. Ползучесть стали 12X18H10T - материала чехлов отработанных тепловыделяющих сборок реактора БН-350 в условиях, моделирующих длительное хранение отработанного ядерного топлива // Вестник НЯЦ РК. 2011. Вып. 3. С. 77 - 82.

POST-RADIATION TESTS OF STAINLESS STEELS – THE STRUCTURAL MATERIALS OF SPENT FUEL ASSAMBLIES FAST NEUTRON NUCLEAR REACTOR BN-350

S.B. Kisilitsin, A.S. Dikov, D.A. Satpaev, A.S. Lationov
Institute of Nuclear Physics of the Ministry of Energy of Republic Kazakhstan,
Ibragimov Str.1, Alma-Ata, 050032, Kazakhstan, skisilitsin@inp.kz

Creep tests results of irradiated stainless steels $\text{C}_{0.12}\text{Cr}_{18}\text{Ni}_{10}\text{Ti}$, $\text{C}_{0.08}\text{Cr}_{16}\text{Ni}_{11}\text{Mo}_3$ and $\text{C}_{0.1}\text{Cr}_{13}\text{Mo}_2\text{BFR}$ – structural materials of fast neutron nuclear reactor BN-350 spent fuel assemblies of the first, second and third generations are presented. Creep test were performed under the conditions (temperature, mechanical stress) typical for long-term storage of spent nuclear fuel. Post-irradiated creep rate and destruction mechanisms of these steels are identified.